中国生态农业学报 2016 年 6 月 第 24 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 837−844

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151289

基于 AMSR-2 蒙古高原土壤水分反演及对气象因子响应分析*

魏宝成[1] 玉 山[2**] 贾 旭[3] 包玉海[1,2] 那日苏[1] 银 山[1,2**]

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古师范大学遥感与地理信息系统重点实验室 呼和浩特 010022; 3. 内蒙古农业大学生态环境学院 呼和浩特 010018)

摘 要 土壤水分是地表水文过程研究的一个重要参数，是众多环境因子综合作用的结果，科学判定土壤水分对环境因子的响应特性，对在蒙古高原地区开展干旱监测预警，调整农业生产结构，改善区域生态环境具有重要意义。本研究基于 AMSR-2 观测亮温、SPOT-NDVI 数据，利用微波辐射传输模型及粗糙地表发射率 Qp 模型，构建适合蒙古高原的土壤水分反演方程，同时将模型应用于2013年蒙古高原植被生长期土壤水分反演。在此基础上，结合 TRMM 3B43 降雨量及气象站点气温数据，探讨了蒙古高原土壤水分对气象因子及植被的响应特性。结果表明：1)构建的蒙古高原表层土壤水分反演模型精度较高，土壤水分反演值与实测值的判定系数为 0.680 6，均方根误差(RMSE)达 0.031 6 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，反演结果明显优于 JAXA 提供的 AMSR-2 土壤水分产品数据(RMSE=0.044 1 $cm^3 \cdot cm^{-3}$)。2)TRMM 3B43 降雨数据与实测降雨量线性拟合，其判定系数为 0.859 8，直线拟合斜率 K=0.941 5，在数值上较站点实测值略微偏低，表明 TRMM 3B43 数据精度较高，在蒙古高原具有很好的适用性。3)蒙古高原植被生长期土壤水分、植被指数及降水量在空间格局上均表现出由北向南、由东北向西南逐渐减少的趋势。干旱区，土壤水分对气温变化最敏感，二者表现出显著正相关关系，其次为降水和植被；半干旱区，植被是影响土壤水分的关键因子，而气温与降水对土壤水分影响呈现出季节性变化；半湿润区 3 个因子对土壤水分的影响程度表现为植被>降水>气温。总之，利用土壤水分对气象因子和植被的响应特性，可以采取适当措施降低蒙古高原灾害发生风险，为区域生态环境建设提供科学依据。

关键词 土壤水分 气象因子 植被 AMSR-2 蒙古高原
中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)06-0837-08

Analysis of soil moisture retrieval and response to meteorological factors using AMSR-2*

WEI Baocheng[1], YU Shan[2**], JIA Xu[3], BAO Yuhai[1,2], NA Risu[1], YIN Shan[1,2**]

(1. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geographical Information System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 3. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract Soil moisture is an important component of the hydrologic cycle in terrestrial ecosystems and it is critical for predicting and understanding various hydrological processes, including changes in weather conditions, precipitation patterns, runoff generation and irrigation scheduling. Soil moisture is a function of the total effect of environmental factors. The

* 国家自然科学基金项目(41461102)、内蒙古自然科学基金项目(2013ZD08, 2013MS0601)和内蒙古科技重大专项(2013ZDPY04)资助
** 通讯作者: 银山，主要从事自然地理学和荒漠化及自然灾害方面的研究，E-mail: yinshan@imnu.edu.cn；玉山，主要从事自然灾害监测与防治研究，E-mail: yushangis@163.com
魏宝成，主要从事自然灾害监测与防治研究。E-mail: nsdwbc@126.com
收稿日期: 2015−12−04 接受日期: 2016−02−19

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (41461102), the Natural Science Foundation of Inner Mongolia (2013ZD08, 2013MS0601) and the Grand Science and Technology Project of Inner Mongolia (2013ZDPY04)
** Corresponding author, YIN Shan, E-mail: yinshan@imnu.edu.cn; YU Shan, E-mail: yushangis@163.com
Received Dec. 4, 2015; accepted Feb. 19, 2016

Mongolia Plateau is an ideal area for studying the interaction between soil moisture and environmental factors, because of its arid and semi-arid location and its high ecological fragility and sensitivity to global climate change. Therefore, it was necessary to study the response of soil moisture to environmental factors, which was favorable to monitor and predict droughts, adjust agricultural production structures and improve regional eco-environment in the Mongolia Plateau. A soil moisture retrieval model for the Mongolia Plateau was built using microwave radiance transfer function and Qp model based on AMSR-2 brightness temperature and SPOT normalized difference vegetation index (NDVI) data. Soil moisture was retrieved, and the retrieval precision was verified during vegetation growth period from April to October 2013 in the Mongolia Plateau. Combination with TRMM 3B43 precipitation and air temperature data acquired by meteorological stations, the study explored response characteristics between soil moisture, meteorological factors and vegetation. The results showed that 1) the coefficient of determination (*r*) between retrieved and ground-based soil moisture was 0.680 6, with a root-mean square error (RMSE) of 0.031 6 $cm^3 \cdot cm^{-3}$. The retrieval result was much better than soil moisture product data of JAXA (RMSE = 0.044 1 $cm^3 \cdot cm^{-3}$). 2) The developed model had a high accuracy and was applicable in surface soil moisture estimation. The regression coefficient of the linear fit of the TRMM 3B43 precipitation measure (rainfall) was 0.859 8 and with a slope line of 0.941 5, which suggested that TRMM 3B43 data were applicable in the Mongolia Plateau. 3) Total precipitation, mean NDVI and soil moisture during the growing season decreased gradually from north to south and from northeast to southwest. In the arid region of the study area, soil moisture was significantly and positively correlated with temperature, followed by precipitation and vegetation. In the semi-arid region of the study area, vegetation was the key factor driving soil moisture, and the effects of temperature and precipitation on soil moisture showed seasonal variations. The response of soil moisture to the three factors was in the order of vegetation > precipitation > temperature in the semi-humid region of the study area. In conclusion, the response of soil moisture to both environmental factors and vegetation could provide scientific basis for constructing healthy regional eco-environments with reducing disasters risk.
Keywords Soil moisture; Meteorological factor; Vegetation; AMSR-2; Mongolia Plateau

土壤水分是遥感反演的重要参数之一，是影响全球气候变化、地表水文过程的重要因子，直接控制着地–气间水热传输与平衡[1–3]。遥感技术，特别是微波遥感已经成为监测全球土壤水分变化及能量循环的重要技术手段之一[1,4]。

微波遥感反演土壤水分的机理在于土壤介电常数强烈依赖土壤水分，即便土壤水分的微小变化，也会对微波辐射计观测到的亮温产生巨大影响，从而直接导致地表发射率及反射率的明显改变[5]。研究表明，地表粗糙度及植被会降低发射率对土壤水分的敏感性，并且影响力随观测频率增加而增加[6]。先进微波扫描辐射计2(Advanced Microsoft Scanning Radiometer 2，AMSR-2)的成功发射为微波遥感观测注入了新鲜血液，使其成为监测地球水分变化强有力的工具，并由日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency，JAXA)发布实时土壤水分产品。产品数据采用 Fujii 等[7]提出的 Lookup Table 算法反演土壤水分，在其算法中将全球地表粗糙度和植被光学厚度固定为常数，这大大限制模型在复杂地表结构区域的适用性。

中国内蒙古自治区与蒙古国共同构成了蒙古高原的主体，在干旱半干旱的自然环境作用下，蒙古高原生态环境极为脆弱，对气候变化的响应非常敏感[8]。其中，土壤湿度是对气候变化响应较为敏感的环境因子之一，其分布特征直接影响地表植被分布及生长发育。土壤水分易受气温、降水、风速、植被及地形地貌等环境因子影响，是各因子综合作用的结果[9]。但是由于数据资源限制，尤其是蒙古国土壤水分实测数据的缺失，使得大多数研究局限于小区域范围内，仅分析实测土壤水分数据对某单一因子的响应特性[10–13]及不同土壤深度土壤水分的变化特征[11,13–14]等。而在全球气候变化的大背景及区域尺度范围下，蒙古高原土壤水分对气象因子及植被的响应特性等问题研究较少。

针对上述问题，本研究基于 Jackson 等[15]提出的单通道算法，利用 36.5GHZ 垂直极化亮温估算地表温度[16–17]，采用归一化植被指数与植被含水量的经验关系模拟植被光学厚度[15,18]，最后借助 Shi 等[19]发展的 Qp 算法标定地表粗糙度。在此基础上，重新构建适合蒙古高原表层土壤水分反演模型，并反演了 2013 年植被生长期(4—10 月)蒙古高原表层土壤水分，同时结合研究区气温、降水及 NDVI 数据，探讨土壤水分对气象因子及植被的响应特性，为在蒙古高原地区开展干旱监测预警，调整农业生产结构，改善区域生态环境提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

蒙古高原为亚洲内陆高原，位置介于 36°34′~53°06′,

86°33′~126°38′之间，面积 2.75×10^6 km^2。蒙古高原四面环山，东起大兴安岭西麓，西至萨彦岭、阿尔泰山，北界为萨彦岭、雅布洛诺夫山及肯特山脉，南以阴山山脉为界，包括蒙古共和国全部，俄罗斯西伯利亚南部，中国内蒙古自治区及新疆维吾尔自治区的部分地区。本研究选取蒙古高原的主体部分蒙古国与中国内蒙古自治区为研究对象(图 1)。研究区地貌类型以山地和高平原为主，高原面平均海拔 1 580 m，地势由西向东逐渐降低。

蒙古高原属于典型温带大陆性气候区，冬季严寒漫长，夏季炎热干燥。降水主要源于北部北冰洋，南部太平洋，降水量由北向南，由东南向西北逐渐减少。由于受降水、温度、土壤特性等影响，植被覆被类型由北向南依次为森林→森林草原→典型草原→荒漠草原→戈壁荒漠→典型草原，生态环境多样且较为脆弱。

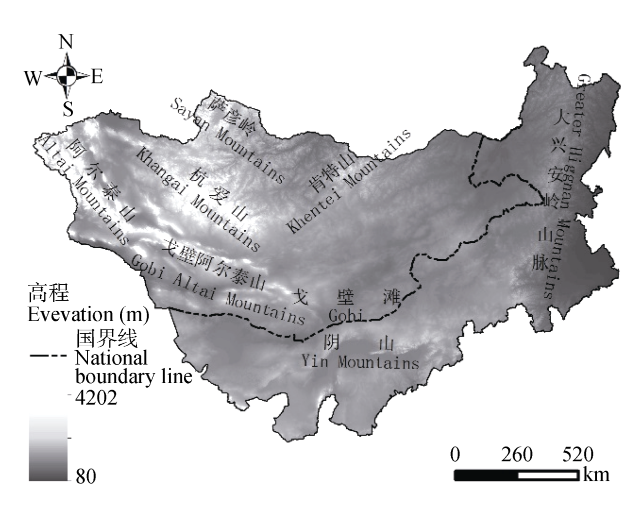


图 1　研究区 DEM 空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of DEM in the study area of the Mongolia Plateau

1.2　数据来源与土壤水分反演

1.2.1　数据来源

搭载 AMSR-2 传感器的“第一轮卫星计划之全球水圈变化观测卫星”(global change observation mission for water-1,GCOM-W1)，由日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)于 2012 年 5 月 1 日成功发射。AMSR-2 是地球观测系统先进微波扫描辐射计(advanced microwave scanning radiometer for earth observing system, AMSR-E)的后继，其主要观测任务为探测地球水分与能量循环。传感器天线扫描角为 55°，包括 6.9 GHZ、7.3 GHZ、10.65 GHZ、18.7 GHZ、23.8 GHZ、36.5 GHZ 和 89 GHZ，7 频率 14 个通道数据，其亮温数据空间分辨为 0.1°。与 AMSR-E 相比，AMSR-2 新增加 7.3 GHZ 两通道，其目的是为了减少 C 波段无线电干扰，进而获得比较可靠的土壤水分数据[20]。本研究从 JAXA 的 GCOM-W1 数据服务中心(http://gcom-w1.jaxa.jp/product-download.html)获取 2013 年蒙古高原植被生长期(4—10 月)各月上、中、下旬 AMSR-2 L1R 亮温数据，数据格式为 HDF 5，地理坐标为 WGS-84。

降水数据来源于热带降雨计划卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)观测数据。TRMM 由日本国家发展局与美国国家宇航局共同开发，于 1997 年 11 月成功发射。卫星携带有两个微波传感器：被动微波辐射计和降雨雷达，其主要目的为监测热带、亚热带降水状况[21]。为了延长卫星使用寿命，轨道高度由 350 km 升至 400 km，扫描范围由南北纬 35°之间扩大至南北纬 50°，能覆盖蒙古高原绝大部分区域。本研究所用降水数据为 2013 年 4—10 月 TRMM 3B43(http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/)，该数据集由 TRMM 3B42 全球 3 小时降水产品制作而成，数据单位为 $mm\cdot h^{-1}$，需要将其转化为月降水数据(转化公式为：DN×24×每月天数)，影像空间分辨率为 0.25°。

SPOT-NDVI 数据可由比利时弗莱芒技术研究所(Flemish Institute for Technological Research, VITO) VEGETATION 影像中心下载，影像空间分辨率为 0.008 929°，时间分辨率为 10 d，数据选择时间同样是 2013 年蒙古高原植被生长期数据集。为了与 AMSR-2 微波数据进行匹配，同时将 TRMM 降雨数据集及 NDVI 数据集重采样至 0.1°。

地面实测数据包括两种数据源：1)来自于中国锡林浩特国家气象观测台 8 个观测站的土壤水分数据，主要目的是对土壤水分反演结果进行精度验证；2)来自于蒙古国及中国内蒙古共 107 个气象站点的月平均降水量和平均气温数据，平均降水量主要用于验证 TRMM 3B43 降水数据在蒙古高原的适用性，为本研究准确分析土壤水分对气象因子的响应特性及今后将 TRMM 数据应用于蒙古高原降雨变化监测提供依据。

1.2.2　土壤水分反演

在微波低频波段(小于 37 GHZ)忽略大气影响的情况下，对于植被覆盖地表，微波辐射计观测到的亮温一般只考虑植被地表的双层零阶辐射传输模型[22]，即：

$$T_{bp}=T_s\left[e_{sp}e^{-\tau_c}+\left(1-\omega_p\right)\left(1-e^{-\tau_c}\right)\left(1+\left(1-e_{sp}\right)e^{-\tau_c}\right)\right] \tag{1}$$

式中：T_{bp} 为微波辐射计观测亮温(K)，T_s 为地表温度(K)，e_{sp} 为地表发射率，ω_p 为植被单次散射反照率，

τ_c 为观测方向上植被光学厚度。在低频情况下，植被单次散射反照率可忽略不计近似为 0。

地表温度(T_S)可由 36.5 GHZ 垂直极化通道进行计算[23]，对于升轨和降轨数据 T_S 计算公式如下:

$$T_{S,A} = 0.898 \times T^{v,A,36.5GHZ} + 44.2 \tag{2}$$

$$T_{S,D} = 0.893 \times T^{v,D,36.5GHZ} + 44.8 \tag{3}$$

式中: $T_{S,A}$ 和 $T_{S,D}$ 分别为升轨与降轨对应的地表温度(K)，$T^{v,A,36.5GHZ}$ 和 $T^{v,D,36.5GHZ}$ 为与之对应的 35.6 GHZ 升/降轨垂直极化亮温(K)。

植被光学厚度(τ_c)反映了植被层对地表发射率的衰减，它与植被含水量(vegetation water content, VWC)呈近似线性关系，计算公式如下:

$$\tau_c = b_p \times \mathrm{VWC} / \cos\theta \tag{4}$$

$$\mathrm{VWC} = \begin{cases} 0 & (\mathrm{NDVI} < 0.17) \\ 1.913\,4 \times \mathrm{NDVI}^2 - 0.321\,5 \times \mathrm{NDVI} & (0.17 \leqslant \mathrm{NDVI} < 0.5) \\ 4.285\,7 \times \mathrm{NDVI} - 1.452\,9 & (\mathrm{NDVI} \geqslant 0.5) \end{cases} \tag{5}$$

式中: VWC 为植被含水量(kg·m^{-2})，b_p 与植被冠层结构和频率有关，θ 为传感器观测角度，NDVI 为归一化植被指数。

通过公式(4)和(5)标定出植被光学厚度后，代入公式(1)即可分离出地表发射率 e_{sp}。但是，在众多情况下，土壤表面相对于微波波长是粗糙的。因此，在土壤水分反演中，必须消除地表粗糙度对土壤发射率的影响。Chen 等[24]在随机表面散射模型—积分方程模型(integrated equation model, IME)的基础上，发展了高级积分方程模型(advanced integrated equation model, AIEM)，该模型可在一个很宽的地表粗糙度范围内再现真实地表的辐射状况且模拟精度高，但模型过于复杂，不利于反演。Shi 等[19]于 2005 年提出了基于 Q_p 模型的双通道反演算法，通过模拟发现该算法与 AIEM 模型模拟结果具有很好的一致性。

因此，本研究使用 AMSR-2 的 6.9 GHZ 频率数据，入射角为 55°，利用微波辐射传输方程分离出地表发射率，双通道反演算法剔除粗糙度对地表发射率的影响，建立土壤水分与粗糙表面发射率的关系:

$$\mathrm{SMC} = A + B \times \left(2.197\,1 \times t_v + 1.051\,9 \times t_h\right) + C \times \sqrt{2.197\,1 \times t_v + 1.051\,9 \times t_h} \tag{6}$$

$$2.197\,1 \times t_v + 1.051\,9 \times t_h = 2.234\,1 \times e_v + e_h \tag{7}$$

式中: SMC 为土壤体积含水量(cm^3·cm^{-3})，t_v、t_h 分别为 V/H 极化方式下菲涅尔透过率，e_v、e_h 为 V/H 极化方式下地表发射率，A、B、C 为待定系数。最后结合 Dobson 模型[25]中，介电常数与土壤水分的关系以及介电常数与菲涅尔透过率的关系计算待定系数 A、B、C。

在 Dobson 模型中，所需的研究区土壤质地数据，采用全球“和谐世界土壤数据集”(Harmonized World Soil Database, HWSD)中的表层土壤砂土、黏土百分含量及土壤容重(g·cm^{-2})信息。通过标定待定 A、B、C，从而得到适合蒙古高原的土壤水分反演方程:

$$\mathrm{SMC} = 4.047\,5 + 0.577\,9 \times \left(2.234\,1 \times e_v + e_h\right) - 3.292\,7 \times \sqrt{2.234\,1 \times e_v + e_h} \tag{8}$$

式中: SMC 为土壤体积含水量(cm^3·cm^{-3})，e_v，e_h 为 V/H 极化方式下地表发射率。

1.2.3 反演精度评价

检验土壤水分反演精度的标准是用实测数据进行验证，精度检验方法通过引入实测值与反演值之间的均方根误差(Root-Mean Square Error, RMSE)进行检验，计算公式如下:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - M_i)^2}{n}} \tag{9}$$

式中: RMSE 为均方根误差，i 为观测点序号，n 为观测点个数，R_i 和 M_i 分别表示实测值与反演值。

2 结果与分析

2.1 土壤水分及 TRMM 降雨数据精度验证

由公式(8)反演得到蒙古高原植被生长期(4—10 月)各月上、中、下 3 旬升/降轨共 63 景土壤水分数据。为了解决 AMSR-2 升/降轨土壤水分数据的裂隙问题，采用同日升/降轨土壤水分平均合成法，以获取每月各旬完整覆盖蒙古高原的土壤水分数据(共 21 景)。用于验证反演精度的 8 个观测点位于 AMSR-2 土壤水分图像一个像元内，像元坐标为 44°12′16.07″N, 116°17′43.93″E。研究表明，微波探测土壤水分的有效深度一般为 2~5 cm，在 10.65 GHZ 频率，微波穿透的有效深度约为 1 cm。由于试验区土壤水分观测站探针埋设的最浅深度为地表以下 2 cm，所以本研究选取土壤深度为 2 cm 处的实测数据进行验证。在剔除观测数据异常值基础上，取 8 个观测点的平均值作为该像元当天土壤水分值，实测数据与 AMSR-2 反演结果验证如图 2a 所示。

由图 2a 可以看出，土壤水分反演结果与实测点 2 cm 深处的土壤水分具有较好的相关性，Pearson 相关系数为 0.825，并且通过了 0.01 的显著性水平检验，均方根误差达 0.031 6 cm^3·cm^{-3}，同时计算得到 JAXA 提供的 AMSE-2 土壤水分产品数据与实测土壤水分值的均方根误差为 0.044 1 cm^3·cm^{-3}。由此看

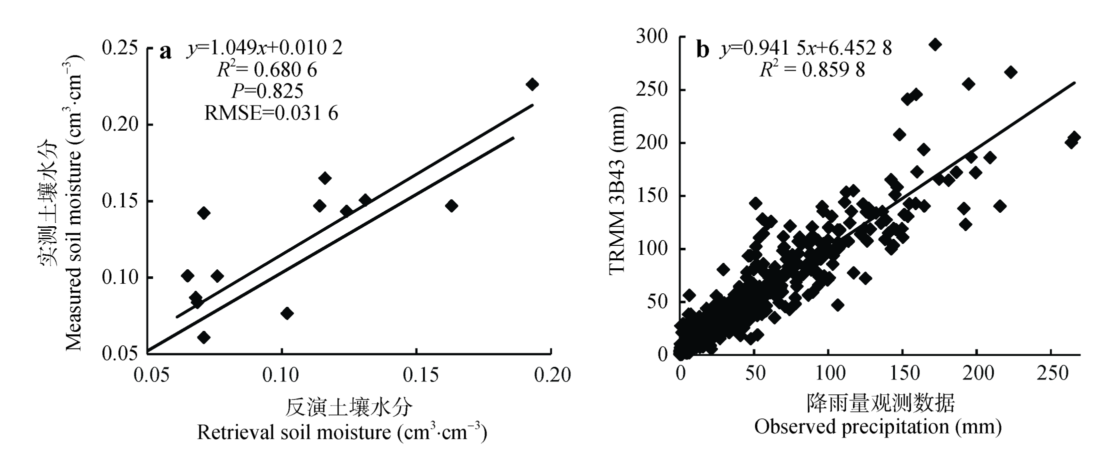


图 2　蒙古高原土壤水分 AMSR-2 反演值与实测值散点图(a)和月降雨量气象站与 TRMM 3B43 数据散点图(b)
Fig. 2　Scatter diagrams between measured and AMSR-2 retrieved soil moisture (a) and between monthly precipitation derived from TRMM 3B43 and in situ precipitation (b) of the Mongolia Plateau

到，利用本研究构建的模型反演出的蒙古高原表层土壤水分结果明显优于 JAXA 提供的土壤水分产品数据。

通过提取研究区 107 个气象观测点对应的 TRMM 3B43 降雨格点数据与实测月平均降雨量数据进行线性拟合(图 2b)，看到二者判定系数(R^2)为 0.859 8，直线拟合斜率 K=0.941 5，在数值上比站点实测值略微偏低，表明 TRMM 3B43 数据在月时间尺度上精度较高，进一步说明该数据源在蒙古高原区域有很好的适用性，可应用于该区域的降雨变化监测。

2.2　蒙古高原土壤水分、降水及植被指数空间分布特征

图 3a~c 显示蒙古高原 2013 年植被生长期平均土壤水分、平均植被指数以及年降水量的分布状况。三者在空间格局上表现出相似的分布特征，即平均土壤水分、年降水量以及平均植被指数均由北向南、由东北向西南方向逐渐减少。

整个蒙古高原土壤平均水分状况介于 0.047~0.234 cm^3·cm^{-3}(图 3a)，土壤水分区域差异明显。土壤水分较高区域主要分布在蒙古国萨彦岭—肯特山以东山间盆地区域以及中国内蒙古东部大兴安岭落叶针叶阔叶林区域，一直向南延伸至科尔沁沙地北缘地带，根据等湿度线看到，这些区域土壤水分值均大于 0.12 cm^3·cm^{-3}；土壤水分过渡区域，其土壤水分值在 0.08~0.12 cm^3·cm^{-3} 范围内，主要为蒙古高原典型草原及部分荒漠草原区域，需要指出的是，在中国内蒙古阿拉善盟巴丹吉林—腾格里沙漠区域，土壤水分值在 0.1 cm^3·cm^{-3} 左右，明显高于周边区域，可能原因与该区域分布着大量湖泊有关；而在整个高原内部区域，土壤水分含量小于 0.08 cm^3·cm^{-3}，最小值出现在蒙古国阿尔泰山—戈壁阿尔泰山北部戈壁荒漠区域，土壤水分含量不足 0.06 cm^3·cm^{-3}。

由图 3b 可知，2013 年蒙古高原降水总量介于 23.84~748.48 mm。自中国内蒙古东北部大兴安岭地区 700 mm 降水量依次向西北方向迅速减少，最小值出现在阿尔泰山—戈壁阿尔泰山南麓及中国内蒙古阿拉善盟西部巴丹吉林沙漠腹地区域，年降水量不足 100 mm。根据等降雨线分布状况，将研究区划分成 3 个气候区域：年降水量在 400~800 mm 的半湿润区，主要在蒙古国萨彦岭—肯特山山脉以东、东方省北部以及中国内蒙古土默特平原、锡林郭勒草原以东森林–森林草原区；年降水量小于 200 mm 的干旱区，主要在蒙古国杭爱山脉南麓，中戈壁省、东戈壁省全部以及中国内蒙古鄂尔多斯高原–苏尼特左旗以西的戈壁荒漠–荒漠草原区；年降水量介于 200~400 mm 半干旱区，主要为典型草原、部分荒漠草原区。

2013 年蒙古高原植被生长期 NDVI 平均值介于 0.03~0.61 (图 3(c))，与研究区平均土壤水分含量、降雨总量分布特征相似，NDVI 分布状况也由北向南、由东北向西南逐渐较少。

2.3　土壤水分对气象因子及 NDVI 的响应特性分析

为探讨土壤水分对气象因子以及 NDVI 的响应特性，按照降水量划分气候子区，提取每个气候子区所有栅格的土壤水分、降水量、气温及 NDVI 值，将结果导入 SPSS 软件计算 Pearson 相关系数，结果如表 1 所示。

在降水量小于 200 mm 的干旱区，降水与土壤水分及气温与土壤水分的关系表现出显著正相关关系。从 4 月份开始，伴随着气温逐步回升，土壤水分含量随气温升高而增加，二者的 Pearson 相关系数在

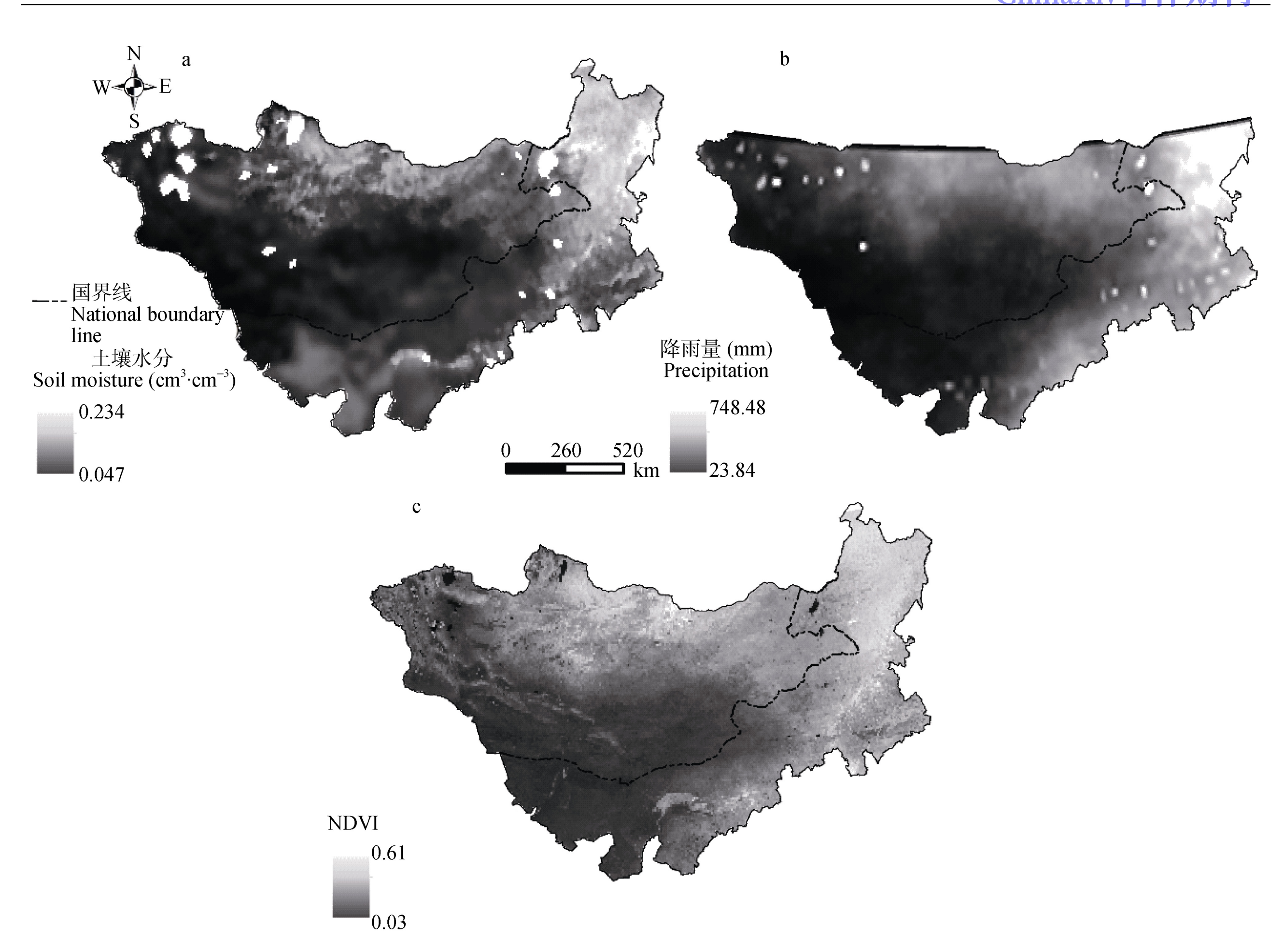


图 3 蒙古高原植被生长期土壤水分、降雨量及平均植被指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil moisture, precipitation and NDVI during the growth stage of vegetation of the Mongolia Plateau

表 1 蒙古高原不同气候子区土壤水分(SM)与气温(TS)、降水(PT)及植被指数(VI)的相关关系

Table 1 Correlation coefficients between soil moisture (SM) and precipitation (PT), air temperature (TS), NDVI (VI) in different climatic regions of the Mongolia Plateau

气候区 Climatic region		4月 Apr.	5月 May	6月 Jun.	7月 Jul.	8月 Aug.	9月 Sep.	10月 Oct.
干旱区 Arid	TS-SM	0.252*	0.440*	0.264*	0.086*	0.008	0.090*	0.264*
	PT-SM	0.232*	−0.103*	−0.083*	0.385*	0.492*	0.048*	−0.092*
	SM-VI	0.170*	−0.202*	−0.017	0.341*	0.407*	0.155*	0.146*
半干旱区 Semi-arid	TS-SM	0.078*	0.264*	−0.134*	−0.112*	−0.490*	0.260*	0.538*
	PT-SM	−0.019	−0.166*	−0.057*	0.393*	0.426*	0.019	0.273*
	SM-VI	0.049*	0.090*	0.558*	0.772*	0.766*	0.674*	0.125*
半湿润区 Semi-humid	TS-SM	0.390*	0.021	−0.485*	−0.085*	−0.320*	−0.198*	0.118*
	PT-SM	−0.549*	0.081*	0.305*	0.416*	0.400*	0.219*	0.162*
	SM-VI	0.333*	0.606*	0.831*	0.788*	0.628*	0.717*	0.259*

相关系数在 0.01 水平显著(双侧)。 correlation coefficient was significant difference at 0.01 level (2-tailed).

5 月达到最大 0.440。而从同期 PT-SM 相关系数看到，降水量对土壤水分的影响明显较气温小。6—8 月，气温对土壤水分的影响逐渐下降，而降水的作用逐步凸显，在 8 月 PT-SM 相关系数达到最大值 0.492。9—10 月，气温下降，来自太平洋和北冰洋的水汽逐渐退出高原，土壤开始回冻，土壤水分逐渐下降，通过相关系数看到，气温再次成为影响土壤水分的主导因素。植被与土壤水分(SM-VI)表现出显著正相关关系，其对土壤水分的影响小于同期气温或者降水对土壤水分的影响。

在降水量为 200~400 mm 的半干旱区域，气温与降水对土壤水分影响呈现出季节性变化。4—6 月，植被处于全面返青期，需水量增加，同时该时期降水较少，气温逐步上升蒸发量增大，导致土壤水分迅速减少，气温和降水与土壤水分表现显著负相关关系。7—8 月，雨季来临，土壤水分得到补给，降水与土壤

水分呈现显著正相关关系，在 8 月达最大值 0.426，此时气温与土壤水分关系达最大负相关–0.49，可见气温较降雨对土壤水分的影响更加显著。值得注意的是，从 6 月开始，植被对土壤水分的影响开始凸显，二者为显著正相关关系，其相关性表现出先增大后减小的趋势，相关系数从 6 月的 0.558 增加至 7 月最大值 0.772，随后相关系数逐渐减小。综合气温、降水及植被与土壤水分的相关系数得出，半干旱区影响土壤水分的关键因子是植被，其次为气温，最后为降水。

在降水量为 400~800 mm 的半湿润区域，气温与土壤水分为显著负相关关系，而降水与土壤水分呈显著正相关关系。相关系数反映出降水对土壤水分的影响较气温显著。与此同时，植被指数与土壤水分的相关性与同期半干旱区、干旱区相比更加明显，在 6 月二者相关系数达 0.831，其原因是该区域降水量充沛，植被对土壤水分的损耗会得到及时补给，土壤水分条件处于良性循环，这与李小英等[26]在研究黄土高原土壤水分与植被指数关系得出的结论一致，再者对于半湿润区域，植被生长状况较好，其涵养水源的作用也可能是解释植被与土壤水分的相关性较气温和降水显著的原因之一。

3　结论

本研究基于 AMSR-2 微波辐射计观测亮温、SPOT-NDVI 数据，利用微波辐射传输模型及 Qp 模型，构建适合蒙古高原的土壤水分反演方程，将模型应用于 2013 年蒙古高原植被生长期土壤水分反演，同时结合 TRMM 3B43 降雨量及站点气温数据，探讨了蒙古高原土壤水分对气象因子及植被的响应特性，结果表明:

1)构建的模型能够较好地实现蒙古高原土壤水分反演，反演值与实测值之间的相关系数为 0.825，RMSE 达 0.031 6 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，反演结果明显优于 JAXA 提供的 AMSR-2 土壤水分产品数据(RMSE=0.044 1 $cm^3 \cdot cm^{-3}$)，同时对 TRMM 3B43 月降雨数据与蒙古高原 107 个气象站点实测降雨量进行线性拟合，发现二者判定系数 R^2=0.859 8，直线拟合斜率 K=0.941 5，数据精度较高，在数值上比站点实测值略微偏低，进一步说明该数据集在蒙古高原地区具有很好的适用性。

2)在植被生长期内，蒙古高原土壤水分、平均植被指数以及降水量在空间格局上表现出相似的分布特征，即土壤水分、平均植被指数和降水量均由北向南、由东北向西南逐渐减少。

3)在不同的气候子区内，土壤水分对降雨、气温及植被的响应特性差异显著。在干旱区，降水、气温与土壤水分的关系均表现出显著正相关关系，但是土壤水分对气温的响应更加敏感；在半干旱区，植被是影响土壤水分的关键因子，二者相关性表现出先增大后减小的趋势，而气温与降水对土壤水分影响呈现出季节性变化；在半湿润区，气温与土壤水分为显著负相关，而降水与土壤水分呈显著正相关，植被与土壤水分的相关性与同期半干旱区、干旱区相比更加显著，相关系数显示了植被是影响半湿润区土壤水分分布的主要因素，降水次之，气温最小。

土壤水分作为地表水文过程研究的一个重要参数，是众多环境因子综合作用的结果，科学判定土壤水分对环境因子的响应特性，对蒙古高原开展干旱监测预警，调整农业生产结构，改善区域生态环境具有重要意义。在本研究中，利用微波遥感提取 2013 年蒙古高原植被生长期表层土壤水分，并结合 TRMM、SPOT-NDVI 等多源遥感数据，讨论了在区域尺度下气温、降水及植被对土壤水分的响应特性，与其他在小尺度范围，探讨某单一因子对土壤水分的影响相比具有一定新意。但是，在如此大的尺度范围内，土壤特性、地形因子等对土壤水分的影响往往不可忽视。今后将在此基础上继续深入探索土壤水分对多因子的响应特性，力求通过某种关系可以实现对蒙古高原土壤水分变化趋势进行预测，从而更好地为该区域生态环境建设及各种预警监测等提供科学指导。

参考文献 References

[1] 赵少华, 秦其明, 沈心一, 等. 微波遥感技术监测土壤湿度的研究[J]. 微波学报, 2010, 26(2): 90–96
Zhao S H, Qin Q M, Shen X Y, et al. Review of microwave remote sensing on soil moisture monitoring[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(2): 90–96

[2] Parinussa R M, Holmes T R H, Wanders N, et al. A preliminary study toward consistent soil moisture from AMSR2[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(2): 932–947

[3] Kim S, Liu Y Y, Johnson F M, et al. A global comparison of alternate AMSR2 soil moisture products: Why do they differ?[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 161: 43–62

[4] 鲍艳松, 毛飞, 闵锦忠, 等. 基于FY-3B/MWRI数据的裸土区土壤湿度反演[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 131–137
Bao Y S, Mao F, Min J Z, et al. Retrieval of bare soil moisture from FY-3B/MWRI data [J]. Remote Sensing for Land & Sources, 2014, 26(4): 131–137

[5] 马媛. 新疆土壤湿度的微波反演及应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007
Ma Y. Study on soil moisture inversion and application with microwave remote sensing in Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang

University, 2007
[6] 田辉, 王澄海, 文军, 等. 基于简化参数方法的蒙古干旱区土壤湿度被动微波遥感[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 415–427
Tian H, Wang C H, Wen J, et al. Soil moisture estimation over an arid environment in Mongolia from passive microwave remote sensing based on a simplified parameterization method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 415–427
[7] Fujii H, Koike T, Imaoka K. Improvement of the AMSR-E algorithm for soil moisture estimation by introducing a fractional vegetation coverage dataset derived from MODIS data[J]. Journal of the Remote Sensing Society of Japan, 2009, 29(1): 282–292
[8] 包刚, 包玉海, 覃志豪, 等. 近 10 年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 613–621
Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. Vegetation cover changes in Mongolian Plateau and its response to seasonal climate changes in recent 10 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 613–621
[9] 杨绍富, 刘志辉, 闫彦, 等. 融雪期土壤湿度与土壤温度、气温的关系[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 642–646
Yang S F, Liu Z H, Yan Y, et al. Preliminary study on soil humidity and its relationships with soil temperature and air temperature in snow melting season [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(5): 642–646
[10] 段亮亮, 满秀玲, 刘玉杰, 等. 大兴安岭北部天然落叶松林土壤水分空间变异及影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(4): 36–41
Duan L L, Man X L, Liu Y J, et al. Soil moisture spatial variability and affecting factors of natural larch forest in northern region of Daxinganling Mountains of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(4): 36–41
[11] 冯伟, 杨文斌, 党宏忠, 等. 毛乌素沙地流动沙丘土壤水分对降雨的响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 400–406
Feng W, Yang W B, Dang H Z, et al. Response of soil moisture to rainfall in the mobile dunes of the Mu Us Sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 400–406
[12] 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 715–718
Zhang Q, Xiao F J, Niu H S, et al. Analysis of vegetation index sensitivity to soil moisture in the Northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 715–718
[13] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地沙质草场土壤水分对干旱和降雨响应的空间变异性[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 140–144
Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Spatial variability of soil moisture responding to drought and rainfall in sandy grassland of Horqin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 140–144
[14] 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征[J]. 地理学报, 2003, 58(S): 83–90
Guo W D, Ma Z G, Yao Y H. Regional characteristics of soil moisture evolution in northern China over recent 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(S): 83–90
[15] Jackson T J, Le Vine M D, Hsu A Y, et al. Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: The southern great plains hydrology experiment [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2136–2151
[16] Owe M, de Jeu R, Walker J. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(8): 1643–1654
[17] Owe M, Van de Griend A A. On the relationship between thermodynamic surface temperature and high-frequency (37 GHz) vertically polarized brightness temperature under semi-arid conditions[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(17): 3521–3532
[18] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation effects on the microwave emission of soils[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36(3): 203–212
[19] Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, et al. A parameterized multifrequency-polarization surface emission model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(12): 2831–2841
[20] 邹晓蕾, 翁富忠, 田小旭. AMSR2 仪器上新增设的 C 波段通道对陆地无线电频率干扰的有效缓解[J]. 气象科技进展, 2015, 5(2): 35–41
Zou X L, Weng F Z, Tian X X. An effective mitigation of radio frequency interference over land by adding a new C-band on AMSR2[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2015, 5(2): 35–41
[21] 李景刚, 黄诗峰, 李纪人. TRMM 数据在区域同期降水趋势特征分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(2): 98–104
Li J G, Huang S F, Li J R. Application of TRMM data in the change trend analysis of regional synchronous precipitation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(2): 98–104
[22] Njoku E G, Chan S K. Vegetation and surface roughness effects on AMSR-E land observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(2): 190–199
[23] Holmes T R H, De Jeu R A M, Owe M, et al. Land surface temperature from Ka band (37 GHz) passive microwave observations[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2009, 114(D4), doi: 10.1029/2008JD010257
[24] Chen K S, Wu T D, Tsang L, et al. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(1): 90–101
[25] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part Ⅱ: Dielectric mixing models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(1): 35–46
[26] 李小英, 段争虎. 基于 SMOS 的黄土高原区域尺度表层土壤水分时空变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 133–139
Li X Y, Duan Z H. Spatial variability of surface soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau based on SMOS[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 133–139